مطالعه‌ی عددی حدود خاموشی و ساختار شعله‌ی نفوذی جریان مخالف H_2/O_2 در حضور رقیق‌کننده‌های Ar و He*

علی اسدی[۱]	جواد خادم[۲]

چکیده *شعله‌های جریان مخالف نفوذی آرام اطلاعات مفیدی را درباره‌ی ویژگی‌های اساسی احتراق غیرپیش‌آمیخته فراهم می‌کنند. مطالعات زیادی روی شعله‌های نفوذی جریان مخالف H_2/O_2 انجام شده است. اکثر مطالعات قبلی شامل سیستم‌های رقیق‌نشده یا هیدروژن رقیق‌شده با CO_2 یا N_2 در مقابل جریان اکسیدکننده است که در شرایط مختلف از قبیل نرخ‌های کرنش، فشارها و دماهای ورودی بررسی شده است. هدف اصلی در این تحقیق بررسی حدود خاموشی شعله و چگونگی تغییر دما در برابر نرخ کرنش است. اثر گازهای Ar و He نیز به‌عنوان رقیق‌کننده بر احتراق H_2/O_2 و حدود خاموشی آن بررسی شده است. برای شبیه‌سازی از کد عددی OPPDIF از نرم‌افزار CHEMKIN استفاده شده است. انطباق خوب نتایج عددی کار حاضر با نتایج سایر محققان، دقت بالای حل عددی را نشان می‌دهد. افزایش درصد رقیق‌کننده کاهش ماکزیمم دما و ماکزیمم کسر مولی رادیکال‌های فعال H و OH را منجر می‌شود. کاهش تولید رادیکال H باعث می‌شود که سوخت کم‌تر تحت تأثیر این گونه قرار گرفته و در نتیجه در سمت اکسیدکننده بیش‌تر نفوذ کند. افزایش درصد رقیق‌کننده باعث کاهش هر دو حد بالا و پایین خاموشی در احتراق هیدروژن می‌شود و حدود اشتعال‌پذیری باریک‌تر می‌گردد. اما افزایش دمای جریان‌های ورودی و فشار محیط، حدود اشتعال‌پذیری را گسترده‌تر می‌کند.*

واژه‌های کلیدی شعله‌های جریان مخالف، شعله‌های نفوذی، حدود خاموشی، رقیق‌کننده، عددی.

The Numerical Study of Extinction Limits and Structure of H_2/O_2 Counterflow Diffusion Flame with Ar and He Dilution

A. Asadi	J. Khadem

Abstract *Laminar counterflow diffusion flames provide useful information about basic properties of non-premixed combustion. A lot of studies have been performed on H_2/O_2 counterflow. Most of previous studies include undiluted or diluted systems of hydrogen (with CO_2 or N_2) against an air flow under a variety of conditions such as strain rates, inlet temperature and pressure. The main purpose of this research is to investigate the extinction limits and also to see how the temperature changes against the strain rate. The effect of Ar and He gases as diluents on combustion and extinction limits of H_2/O_2 is also investigated. Numerical simulations have been done with the OPPDIF code from CHEMKIN software. The obtained numerical results are compared with the others results and show the accuracy of numerical solution. Increasing the diluent percent causes decreasing of the maximum temperature and also the maximum mole fraction of active radicals of H and OH. Decreasing of producing H radical causes the fuel be slightly influenced by this species and thus the fuel diffuses more to oxide side. Increasing the diluent percent also causes decreasing of blow off and quenching limits in hydrogen combustion and accordingly narrows the flammability; But the increasing of inlet temperature flows and ambient pressure extend the flammability limits.*

Key Words Counterflow Flames, Diffusion Flames, Extinction Limits, Diluent, Numerical

---

* تاریخ دریافت مقاله ۹۰/۱۲/۲٤ و تاریخ پذیرش آن ۹۲/۲/۲۹ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند

(۲) نویسنده‌ی مسؤول: استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند

مقدمه

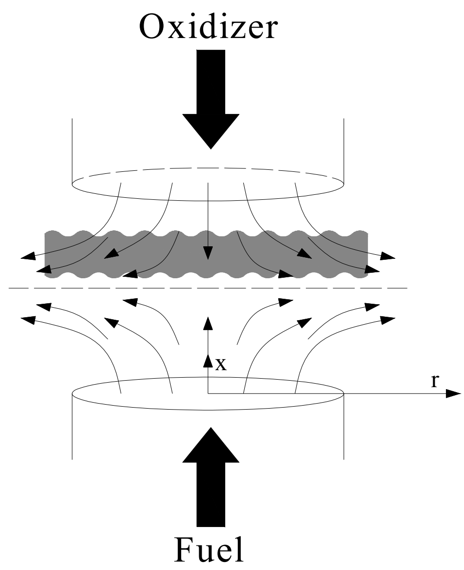
تئوری شعله‌ی نفوذی جریان مخالف از سال‌ها پیش مورد بررسی قرار گرفته است. شعله‌ی جریان مخالف، ناحیه‌ی برخورد دو جت مختلف‌الجهت پایدار سوخت و اکسیدکننده است. به‌علت سرعت متغیر در دهانه‌ی مشعل و سایر تأثیرات فرعی، اغلب شعله‌ها صاف (تخت) نیستند. در مدل گفته‌شده که بر اساس برخورد دو جت گاز جریان مخالف به یک باریکه‌ی شعله است، صفحه‌ی تخت شعله عمود بر محور نازل است که این در شکل (۱) نشان داده شده است.

مطالعات زیادی روی شعله‌های جریان مخالف H_2/Air انجام شده است. اخیراً ریبرت و همکارانش [1] مطالعات عددی موجود در این زمینه را جمع‌آوری کرده‌اند. مطالعه‌ی عددی روی شعله‌ی نفوذی جریان مخالف H_2/Air رقیق‌شده با CO_2 در دمای اتاق توسط پارک و همکارانش [2] انجام شده است.

اثر رقیق‌ساز CO_2 بر شعله‌ی جریان مخالف نفوذی H_2/O_2 در شرایط مختلف شامل دمای ورودی، فشار و سطوح مختلف رقیق‌سازی با CO_2 بررسی شده است [3]. در مطالعه‌ی آنها اثر افزایش CO_2 به‌صورت کاهش دمای بی‌دررو شعله و نیز کاهش انتشار NOx نمایان شده است. هم‌چنین با افزایش فشار محیط، دمای بی-دررو شعله افزایش و ضخامت شعله کاهش می‌یابد.

بررسی ساختار شعله و انتشار NO در شعله‌های جریان مخالف غیرپیش‌آمیخته‌ی H_2/Air رقیق‌شده با CO_2 در مقاله‌ی [4] ارائه شده است. در تحقیق آن‌ها تغییرات دمای ماکزیمم در برابر دمای اکسیدکننده بررسی شده است. افزایش دمای اکسیدکننده باعث افزایش ماکزیمم دما می‌شود، اما افزایش رقیق‌ساز CO_2 ماکزیمم دما را کاهش می‌دهد.

مطالعه‌ی عددی روی ساختار شعله و انتشار NO روی محدوده‌ی وسیعی از دما در شعله‌های آرام H_2/Air رقیق‌شده با بخار آب توسط ماروتی و همکارانش انجام شده است [5]. در مطالعه آن‌ها تولید قابل توجه OH مشاهده شد که به خاطر اثرات شیمیایی بخار آب می‌باشد. هم‌چنین انتشار NO در ساز و کار حرارتی کاهش یافت.



شکل ۱ هندسه‌ی متقارن محوری جریان مخالف نفوذی

در کار حاضر شبیه‌سازی احتراق هیدروژن با استفاده از مدل جریان مخالف نفوذی در حضور رقیق‌سازهای Ar و He انجام شده است. گاز Ar، هوا را از ناحیه‌ی احتراق بیرون می‌راند و از اکسید شدن نازل‌ها و قطعات درگیر با احتراق جلوگیری می‌کند. گاز He دارای ویژگی‌های یکتایی از قبیل نقطه‌ی جوش، چگالی و حل‌شوندگی پایین، رسانش گرمایی بالا و واکنش‌ناپذیری می‌باشد که در بسیاری از کاربردها به آن نیاز است. گاز He به‌دلیل ویژگی واکنش ناپذیری، به‌عنوان یک گاز محافظ نیز استفاده می‌شود و ویژگی‌هایی نزدیک به گاز ایده‌آل دارد. لذا استفاده‌ی هم‌زمان از گاز Ar و He به‌عنوان رقیق‌کننده، نتایج قابل‌توجهی را در پی دارد و باعث افزایش بازده احتراق و خروج به‌تر گازها از محدوده‌ی احتراق

می‌شود. در این مقاله، اثر رقیق‌کننده بر دمای احتراق و تولید گونه‌های H و OH بررسی گردیده و هم‌چنین اثر رقیق‌کننده بر حدود خاموشی شعله مورد مطالعه قرار گرفته است. در این پژوهش، ساز و کار شیمیایی دریر و همکاران [7] که شامل ۲۵ واکنش برگشت‌پذیر و ٦ گونه است، به‌عنوان ساز و کار احتراق هیدروژن انتخاب شده است.

مدل‌سازی ریاضی و معادلات حاکم

معادلات حاکم برای هندسه‌ی جریان مخالف نفوذی که در شکل (۱) نشان داده شده است، به شرح زیر است [8]:

معادله‌ی بقای جرم:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(\rho v r) = 0 \qquad (۱)$$

که در آن u و v مؤلفه‌های سرعت محوری و شعاعی و ρ چگالی سیال می‌باشد. با استفاده از تعریف تابع جریان ψ به شکل زیر داریم:

$$\psi(r,x) = r^2 F(x) \qquad (۲)$$

لذا:

$$\rho u r = \frac{\partial \psi}{\partial r} = 2rF(x) \qquad (۳)$$

$$-\rho v r = \frac{\partial \psi}{\partial x} = r^2 \frac{dF(x)}{dx} \qquad (٤)$$

در نتیجه:

$$\frac{dF(x)}{dx} = -\frac{\rho v}{r} \text{ and } \quad F(x) = \frac{\rho u}{2} \qquad (۵)$$

که در آن $\frac{v}{r}$, u و ρ فقط توابعی از x هستند. تابع G(x) را به‌صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$G(x) = \frac{dF(x)}{dx} \qquad (٦)$$

معادلات مومنتوم محوری و شعاعی به‌ترتیب به‌صورت زیر هستند:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u u r) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v u r) = \frac{\partial}{\partial r}(r\tau_{rx}) + r\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} - r\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x r \qquad (۷)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u v r) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v v r) = \frac{\partial}{\partial r}(r\tau_{rr}) + r\frac{\partial \tau_{rx}}{\partial x} - r\frac{\partial P}{\partial r} \qquad (۸)$$

که در آن $\tau_{rr} = \mu\left[2\frac{\partial v}{\partial r} - \frac{2}{3}(\nabla . V)\right]$ و $\tau_{xx} = \mu\left[2\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3}(\nabla . V)\right]$ و $\tau_{rx} = \mu\left[2\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x}\right]$ است. با ساده‌سازی و نوشتن معادلات بر حسب توابع F و G نتیجه می‌شود:

$$\frac{d}{dx}\left[\frac{F^2}{\rho} - \mu\frac{d}{dx}\left(\frac{F}{\rho}\right)\right] + \frac{1}{2}\mu\frac{d}{dx}\left(\frac{G}{\rho}\right) - \frac{FG}{\rho} + \frac{1}{4}\left(\frac{\partial P}{\partial x} - \rho g_x\right) = 0 \qquad (۹)$$

$$H - 2\frac{d}{dx}\left(\frac{FG}{\rho}\right) + \frac{3G^2}{\rho} + \frac{d}{dx}\left[\mu\frac{d}{dx}\left(\frac{G}{\rho}\right)\right] = 0 \qquad (۱۰)$$

که در آن

$$H = \frac{1}{r}\frac{\partial P}{\partial r} = \text{const.} \qquad (۱۱)$$

نرخ کرنش که معیاری ازسرعت جریان‌های ورودی و فاصله‌ی بین دو نازل است، به شکل زیر تعریف می‌شود [9]:

$$\text{strain rate} = \frac{2V_{OX}}{L}\left(1 + \frac{V_f\sqrt{\rho_f}}{V_{OX}\sqrt{\rho_{OX}}}\right) \qquad (۱۲)$$

در این رابطه ρ_f، ρ_{OX}، V_f، V_{OX} و L به ترتیب چگالی سوخت، چگالی اکسیدکننده، سرعت سوخت، سرعت اکسیدکننده و فاصله‌ی بین دو نازل است.

معادلات انرژی و بقای گونه‌ها به شکل زیر می‌باشند:

$$\rho u\frac{dT}{dx} - \frac{1}{C_p}\frac{d}{dx}\left(\lambda\frac{dT}{dx}\right) + \frac{\rho}{C_p}\sum_k C_{pk} Y_k V_k \frac{dT}{dx} +$$

$$\frac{1}{c_p}\sum_k h_k\dot{\omega}_k = 0 \qquad (۱۳)$$

$$\rho u\frac{dY_k}{dx} + \frac{d}{dx}(\rho Y_k V_k) - \dot{\omega}_k W_k = 0 \qquad (۱٤)$$

که سرعت نفوذی V_k از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید:

$$V_k = \frac{1}{X_k\overline{W}}\sum_{j=1}^{K} W_j D_{kj}\frac{dX_j}{dx} - \frac{D_k^T}{\rho Y_k}\frac{1}{T}\frac{dT}{dx} \qquad (۱۵)$$

یا به شکل فرمولاسیون میانگین برای ترکیب داریم:

$$V_k = \frac{1}{X_k}D_{km}\frac{dX_k}{dx} - \frac{D_k^T}{\rho Y_k}\frac{1}{T}\frac{dT}{dx} \qquad (۱٦)$$

که

$$D_{km} = \frac{1-Y_k}{\sum_{j\neq k}^{K} X_j/\mathcal{D}_{jk}} \qquad (۱۷)$$

و هم‌چنین W, X , D_k^T, D_{jk}, D_{km}, D_{kj} به ترتیب ضرایب چند جزئی، میانگین ترکیب، دوتایی، نفوذ حرارتی، کسر مولی گونه‌ها و وزن مولکولی می‌باشند.

شرایط مرزی برای جریان‌های سوخت (F) و اکسیدکننده (O) در نازل‌ها به شکل زیر هستند.

$$x=0: F = \frac{\rho_F U_F}{2}, G= 0 , T=T_F,$$

$$\rho u Y_k + \rho Y_k V_k = (\rho u Y_k)_F \qquad (۱۸)$$

$$x=L: F = \frac{\rho_o u_o}{2}, G= 0 , T=T_o,$$

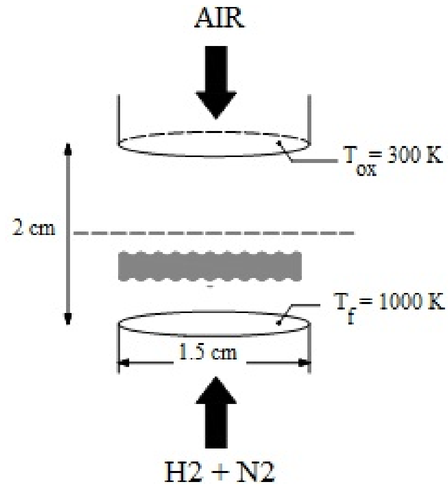
$$\rho u Y_k + \rho Y_k V_k = (\rho u Y_k)_o \qquad (۱۹)$$

شار جرمی کلی شامل نفوذ و جابجایی نسبت به کسر گونه‌ها، از شرایط مرزی ورودی مشخص می‌شود. معادلات دیفرانسیلی (٦، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۳ و ۱٤) و شرایط مرزی (۱۹ و ۱۸) یک مسئله‌ی مقدار مرزی را برای متغیرهای وابسته‌ی (Yk, F, G, H, T) تشکیل می‌دهند. پارامترهای مهم مرتبط با این مسئله سرعت جریان‌های ورودی سوخت و اکسیدکننده، دمای جریان‌های ورودی سوخت و اکسیدکننده، نرخ کرنش و فشار محیط می‌باشد.

انفصال این معادلات دیفرانسیلی مطابق روش‌های شناخته شده صورت می‌گیرد. ترم نفوذ با استفاده از طرح تفاضل مرکزی با خطای مرتبه‌ی دو در فاصله‌ی مش‌بندی منفصل می‌شود. برای ایجاد همگرایی بهتر در انفصال جمله جابجایی از طرح آپ‌ویند (upwind) که قادر به تشخیص جهت جریان است، استفاده می‌شود. دقت این طرح از مرتبه‌ی یک می‌باشد، اما از ایجاد نوسانات در طول حل روی مش‌بندی درشت جلوگیری می‌کند. حل معادلات با استفاده از OPPDIF[10] که یک کد عددی به زبان فرترن است، انجام گرفته است.

نتایج

بررسی اعتبار نتایج. به منظور اعتبار سنجی، نتایج کار حاضر با مقادیر آزمایشگاهی [11] و نتایج عددی هو و آیساک [12] مقایسه شده است. به دلیل اینکه در نتایج آزمایشگاهی از گاز نیتروژن به‌عنوان رقیق‌ساز استفاده شده، لذا فقط این قسمت از نتایج کار حاضر برای شرایط کار آزمایشگاهی [11] اجرا شده است (شکل ۲). به منظور ساده‌سازی فرض شده است، سرعت‌های جریان سوخت و اکسیدکننده با هم برابر باشند. لذا شعله‌ی ایجاد شده بر حسب اینکه مومنتوم سوخت بیش‌تر باشد یا اکسیدکننده و هم‌چنین سوخت تا چه حد توسط رقیق‌کننده تحت تأثیر قرار بگیرد، به سمت سوخت یا هوا جابجا می‌شود. فشار محیط ثابت و برابر ۱ اتمسفر است. دمای سمت اکسیدکننده ۳۰۰K، دمای سمت سوخت ۱۰۰۰K و فاصله‌ی بین دهانه‌ی دو نازل نیز ۲cm در نظر گرفته می‌شود [11].



شکل ۲ مدل انجام شده برای اعتبارسنجی نتایج [11]

شکل (۳) مقایسه‌ی نتایج کار حاضر با نتایج آزمایشگاهی [11] و نتایج عددی هو و آیساک [12] را برای نرخ کرنش $۱۲۰s^{-1}$ و کسر مولی هیدروژن ۰/۶۶۶۷ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج عددی کار حاضر که به وسیله‌ی OPPDIF انجام شده است و نتایج عددی هو و آیساک [12] با دقت بسیار خوبی بر هم‌دیگر و نتایج هر دو کار نیز با دقت خوبی بر نتایج آزمایشگاهی [11] منطبق هستند.

مقایسه‌ی دوم برای حالتی است که در آن نرخ کرنش $۸٤/۱s^{-1}$ و کسر مولی هیدروژن ۰/۸۲٦۵ است (شکل ٤). حل عددی کار حاضر نسبت به حل عددی هو و آیساک [12] در این حالت، انطباق به‌تری بر نتایج آزمایشگاهی دارد و ماکزیمم دما را با دقت بیش‌تری پیش‌بینی می‌کند. ماکزیمم دما در نتایج عددی بیش‌تر از نتایج آزمایشگاهی است.

دلیل اختلاف نتایج آزمایشگاهی با نتایج عددی که در حالت دوم (شکل ٤) بیش‌تر می‌باشد، چشم‌پوشی از تشعشع و نیز تفاوت در تعداد واکنش‌ها و گونه‌های در نظر گرفته شده برای ساز و کار شیمیایی است. هم‌چنین ضریب تصحیح تشعشع برای اندازه‌گیری دما در ترموکوپل‌های آزمایش در نظر گرفته نشده است.

بنابراین ممکن است که اختلاف نتایج آزمایشگاهی با نتایج حل عددی در شکل‌های (٤ و ۳) واقعی نباشد.

اثر رقیق‌کننده بر احتراق H_2/O_2. مدل‌سازی برای چهار شعله با درصد رقیق‌سازی ۰، ۲۰، ٤۰ و ٦۰ اجرا شده است. فشار محیط ثابت و برابر ۱ اتمسفر در نظر گرفته می‌شود و فاصله‌ی دهانه‌ی دو نازل ۲ cm است. دمای ورودی واکنش‌دهنده‌ها در دهانه‌ی نازل‌ها ۳۰۰K در نظر گرفته شده است.

شکل (۵) منحنی‌های دما بر حسب فاصله‌ی دو نازل را در درصدهای مختلف رقیق‌سازی با Ar نشان می‌دهد. افزایش درصد رقیق‌کننده‌ی Ar باعث کاهش غلظت‌های گونه‌های حاضر در واکنش می‌شود و بنابراین شدت واکنش‌ها کاهش می‌یابد. با کاهش شدت واکنش‌ها، شدت واکنش کلی و در نتیجه ماکزیمم دما کاهش می‌یابد. رقیق‌کننده‌ی He نیز اثر مشابهی بر منحنی‌های دما دارد. برای مقایسه‌ی هم‌زمان اثر هر دو رقیق‌کننده بر دما، منحنی‌های ماکزیمم دما بر حسب درصد رقیق‌کننده رسم شده‌اند (شکل ٦). همان‌طور که مشاهده می‌شود منحنی مربوط به حالت رقیق‌سازی با He زیر منحنی مربوط به حالت رقیق-سازی با Ar قرار گرفته است و این یعنی در یک درصد خاص رقیق‌سازی، رقیق‌کننده‌ی He توانایی بیش‌تری در کاهش دما دارد. افزایش ٦۰ درصد رقیق‌کننده‌ی He به سوخت، ماکزیمم دما را در حدود ٤۳۰K کاهش می‌دهد.

با دقت در شکل (۵) درمی‌یابیم که با افزایش درصد رقیق‌کننده موقعیت ماکزیمم دما به سمت اکسیدکننده حرکت می‌کند و این یعنی سوخت بیش‌تر به سمت اکسیدکننده نفوذ می‌کند. شکل (۷) که کسر مولی سوخت (H_2) بر حسب فاصله را نشان می‌دهد، مؤید این مطلب است.

با افزایش درصد رقیق‌کننده و نیز کاهش دما، واکنش‌های شکست بین زنجیره‌های اتم‌های سوخت

که منجر به تولید رادیکال H می‌شود کاهش می‌یابد و در نتیجه از مقدار این رادیکال کاسته می‌شود. در نتیجه سوخت کم‌تر تحت تأثیر رادیکال H قرار گرفته و می‌تواند در سمت اکسیدکننده نفوذ بیش‌تری داشته باشد. شکل (۸) منحنی کسر مولی رادیکال H را در حضور رقیق‌کننده نشان می‌دهد.

منحنی کسر مولی رادیکال OH در شکل (۹) نشان داده شده است. تولید این گونه نیز همانند رادیکال H با افزایش درصد رقیق‌کننده کاهش می‌یابد. کاهش غلظت بر اثر رقیق‌سازی که منجر به کاهش شدت واکنش‌ها می‌شود علت اصلی کاهش تولید دو رادیکال H و OH است. کاهش تولید این دو رادیکال فعال که به نوعی پیش‌برنده‌ی واکنش کلی هستند، سهم بسزایی در کاهش دما دارد.

اثر رقیق‌کننده بر حدود خاموشی H_2/O_2. افزودن گونه‌های ساکن و غیر فعال و نیز رقیق‌کننده‌ها باعث تغییر خواص گرمایی و نفوذی سوخت یا اکسیدکننده می‌شود و در نتیجه حدود خاموشی شعله‌ی نفوذی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. در اینجا اثر سه پارامتر درصد رقیق‌کننده، فشار محیط و دمای جریان‌های ورودی بر حدود خاموشی جریان مخالف نفوذی H_2/O_2 بررسی می‌شود.

شکل‌های (۱۱ و ۱۰) ماکزیمم دمای شعله‌ی جریان مخالف نفوذی H_2/O_2 در سطوح مختلف رقیق‌سازی با Ar و He را بر حسب نرخ کرنش نشان می‌دهند. با افزایش سطح رقیق‌کننده، غلظت گونه‌ها کم می‌شود و شدت واکنش کلی کاهش می‌یابد و در نتیجه دمای شعله کم و اشتعال‌پذیری شدت‌های کرنش باریک‌تر می‌شود. به‌عبارتی هم حد بالای خاموشی و هم حد پایین خاموشی کاهش یافته و محدوده‌ی اشتعال‌پذیری تقلیل می‌یابد. حد بالای خاموشی نسبت به حد پایین خاموشی بیش‌تر تحت تأثیر رقیق‌کننده قرار می‌گیرد.

شکل‌های (۱۳ و ۱۲) ماکزیمم دمای احتراق را بر حسب نرخ کرنش و در دماهای مختلف جریان‌های ورودی نشان می‌دهند. در این حالت درصد در نظر گرفته شده برای رقیق‌سازی ٤۰ است. افزایش دمای ورودی با افزایش نرخ شکست زنجیره‌های بین اتم‌ها و تولید بیش‌تر رادیکال‌های فعال H، O و OH و نیز افزایش شدت واکنش کلی باعث افزایش اشتعال‌پذیری می‌شود. همان‌طور که در شکل‌های (۱۳ و ۱۲) مشاهده می‌شود حد بالای خاموشی توسعه یافته، اما حد پایین خاموشی تا این سطح از افزایش دمای جریان‌های ورودی تغییری نکرده است و حدود اشتعال‌پذیری گسترده‌تر شده است.

شکل‌های (۱۵ و ١٤) ماکزیمم دمای احتراق را بر حسب نرخ کرنش و در فشارهای مختلف محیط نشان می‌دهند. در این حالت نیز ٤۰ درصد رقیق‌سازی در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش فشار، هر دو حد خاموشی توسعه می‌یابند و به این دلیل است که غلظت گونه‌های واکنش‌دهنده در فشارهای بالاتر بیش‌تر است که منجر به افزایش دما نیز می‌شود و این هر دو باعث افزایش شدت واکنش کلی می‌شوند. بنابراین، حدود اشتعال‌پذیری گسترده‌تر می‌گردد.

برای مقایسه‌ی اثر دو رقیق‌کننده بر حدود خاموشی، در ادامه منحنی‌های خاموشی مربوط به حضور هر دو رقیق‌کننده در یک شکل نمایش داده شده است. شکل (١٦) که اثر رقیق‌کننده را بر حدود خاموشی بررسی می‌کند، نشان می‌دهد که رقیق‌کننده‌ی Ar نسبت به He حدود خاموشی را باریک‌تر می‌کند و در حضور این رقیق‌کننده، اشتعال در محدوده‌ی کم‌تری از نرخ کرنش‌ها میسر می‌شود.

شکل‌های (۱۸ و ۱۷) به‌طور جداگانه اثر افزایش دمای ورودی و فشار بر حدود خاموشی را نشان می‌دهند. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، افزایش دمای

جریان‌های ورودی و فشار، حدود خاموشی را افـزایش می‌دهند. بـا دقـت در شـکل‌هـای (۱۸ و ۱۷) مشـاهده می‌شود کـه رقیـق‌کننـده‌ی He توانـایی بـیش‌تـری در توسعه‌ی حدود خاموشی دارد.

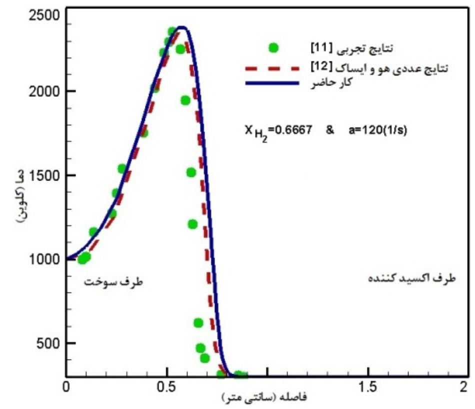
نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق مدل‌سازی شـعله‌هـای جریـان مخـالف نفوذی هیـدروژن در حضـور رقیـق‌سـازهای Ar و He انجام شد. شبیه‌سازی‌ها برای چهار شعله با درصـدهای رقیق‌سازی ۰، ۲۰، ٤۰ و ٦۰ اجرا گردید.

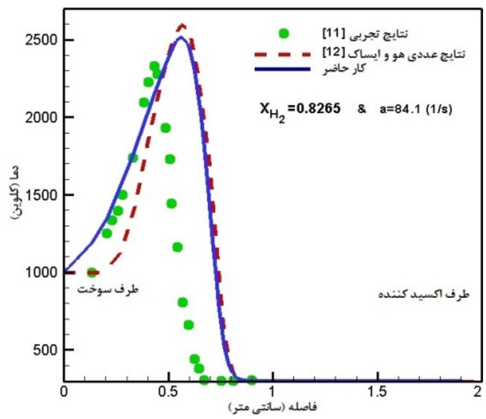
برای بررسی اعتبار نتایج، منحنی‌های دمای مربوط به احتراق هیدروژن رقیق‌شده توسط نیتروژن، با نتـایج عددی و آزمایشگاهی سایر محققان مقایسه شد.

رقیق‌کننده‌ها با کاهش غلظـت گونـه‌هـا منجـر بـه کاهش شـدت واکـنش‌هـا و در نتیجـه کـاهش شـدت واکنش کلی می‌شوند که این بـه کـاهش مـاکزیمم دمـا می‌انجامد. اثر رقیـق‌سـازی و در کنـار آن کـاهش دمـا باعث کاهش واکنش‌هـای شکسـت بـین زنجیـره‌هـای اتم‌های سوخت می‌شود و در نتیجه تولید رادیکال‌هـای فعال H و OH کاهش می‌یابد. با کاهش رادیکال‌های H و OH، سوخت کم‌تر تحت تـأثیر ایـن گونـه‌هـا قـرار گرفته و بیش‌تر در سمت اکسیدکننده نفوذ می‌کند.

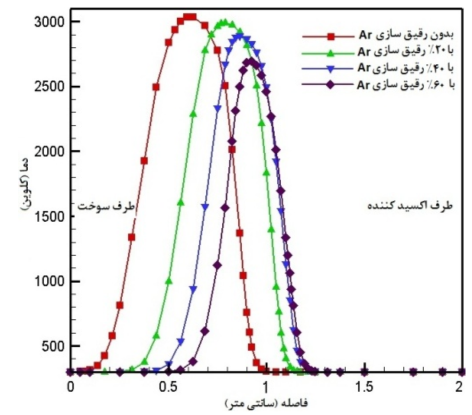
افزایش رقیق‌کننده به سـوخت بـا کـاهش شـدت واکنش کلی باعث کوچک‌تر شدن حدود اشتعال‌پذیری می‌شـود کـه رقیـق‌کننـده‌ی Ar نسـبت بـه He حـدود اشتعال‌پذیری را باریک‌تر مـی‌کنـد. بـرعکس، افـزایش دمـای جریـان‌هـای ورودی و فشـار محـیط، بـه‌طـور جداگانه، از طریق افـزایش شـدت واکـنش‌هـا، حـدود اشتعال‌پذیری را گسترده‌تر می‌کننـد کـه در ایـن مـورد رقیق‌کننده‌ی He نسبت به Ar توانایی بیش‌تری دارد.



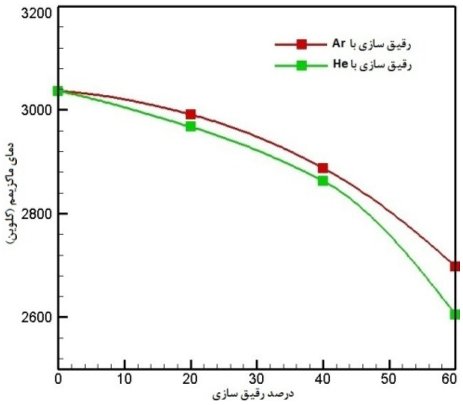
شکل ۳ منحنی دما بر حسب فاصله در احتراق جریان مخالف نفوذی هیدروژن برای حالت اول



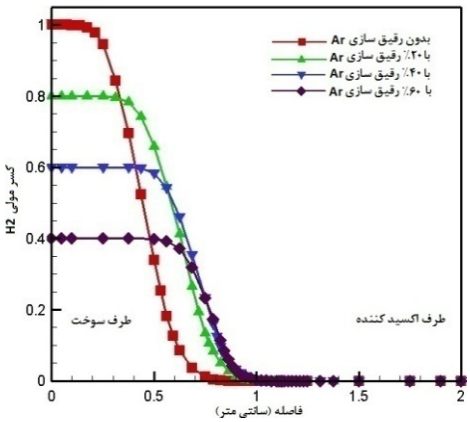
شکل ٤ منحنی دما بر حسب فاصله در احتراق جریان مخالف نفوذی هیدروژن برای حالت دوم



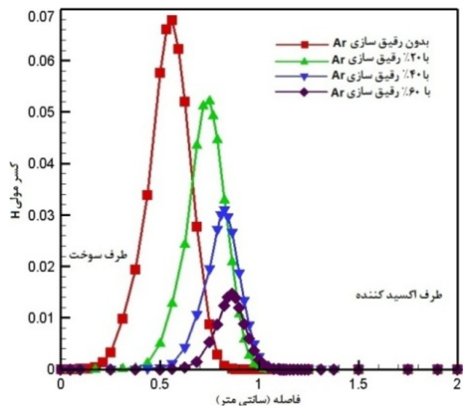
شکل ۵ منحنی‌های دما بر حسب فاصله در درصدهای مختلف رقیق‌سازی با Ar



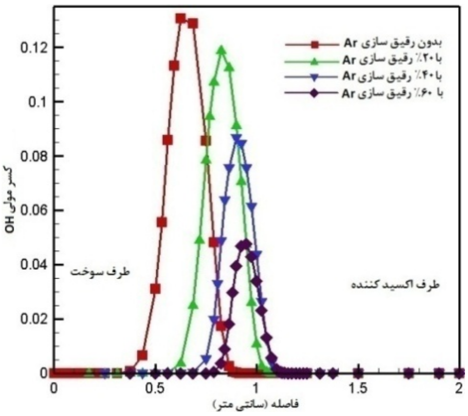
شکل ٦ منحنی‌های دمای ماکزیمم بر حسب درصد رقیق‌سازی مختلف با Ar و He



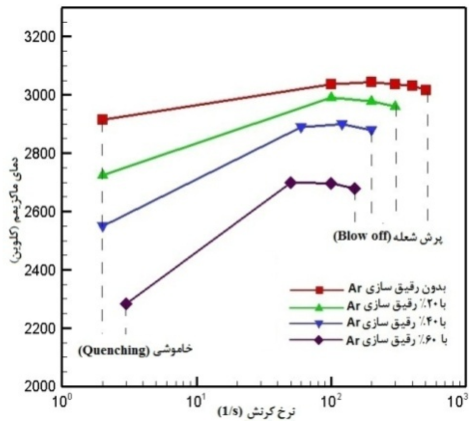
شکل ۷ منحنی‌های کسر مولی H_2 بر حسب فاصله در درصدهای مختلف رقیق‌سازی با Ar



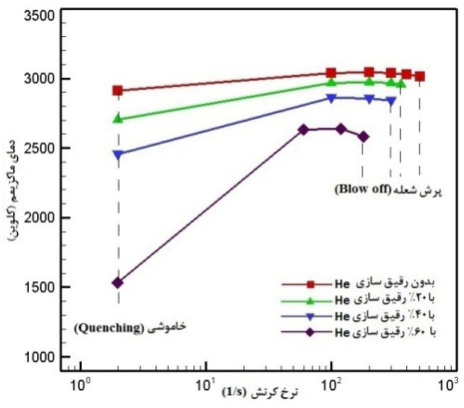
شکل ۸ منحنی‌های کسر مولی H بر حسب فاصله در درصدهای مختلف رقیق‌سازی با Ar



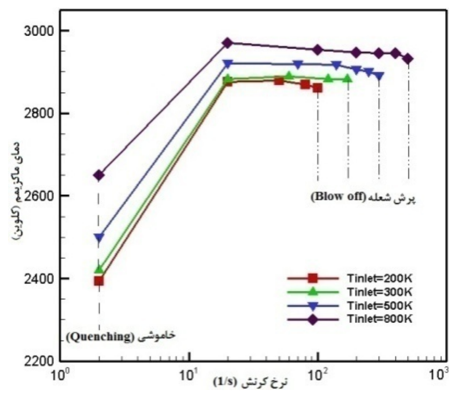
شکل ۹ منحنی‌های کسر مولی OH بر حسب فاصله در درصدهای مختلف رقیق‌سازی با Ar



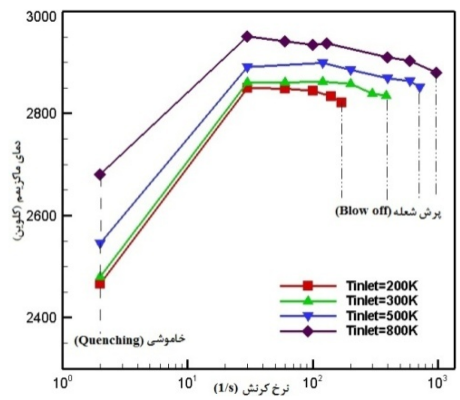
شکل ۱۰ دمای ماکزیمم بر حسب نرخ کرنش در درصدهای مختلف رقیق‌سازی با Ar ($P=1atm, T_{inlet}=300K$)



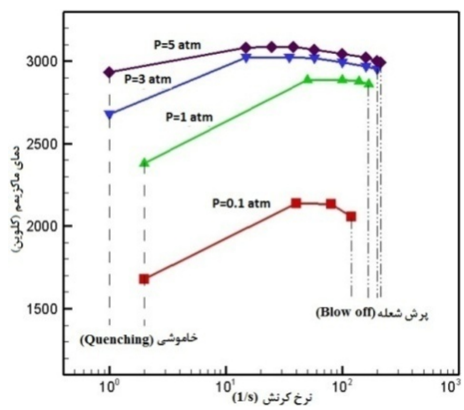
شکل ۱۱ دمای ماکزیمم بر حسب نرخ کرنش در درصدهای مختلف رقیق‌سازی با He ($P=1atm, T_{inlet}=300K$)



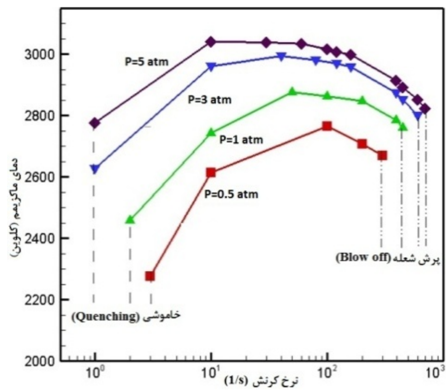
شکل ۱۲ دمای ماکزیمم بر حسب نرخ کرنش در دماهای مختلف جریان‌های ورودی (P=1atm, Dilution=40%Ar)



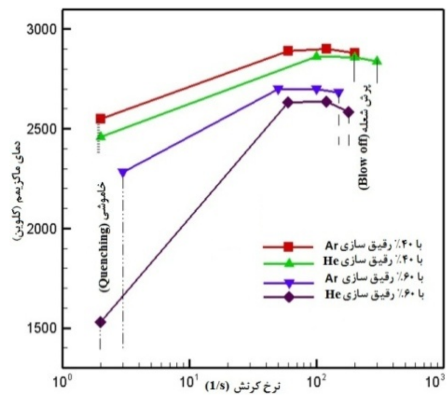
شکل ۱۳ دمای ماکزیمم بر حسب نرخ کرنش در دماهای مختلف جریان‌های ورودی (P=1atm, Dilution=40% He)



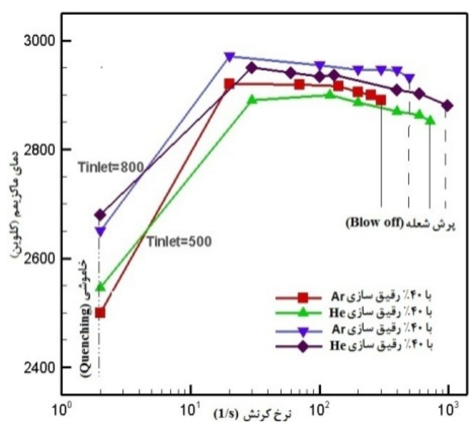
شکل ۱۴ دمای ماکزیمم بر حسب نرخ کرنش در فشارهای مختلف محیط (T_{inlet}=300K, Dilution=40% Ar)



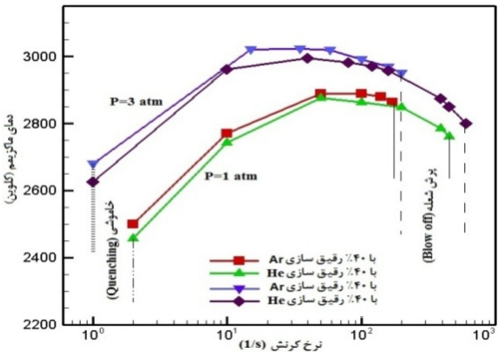
شکل ۱۵ دمای ماکزیمم بر حسب نرخ کرنش در فشارهای مختلف محیط (T_{inlet}=300K, Dilution=40% He)



شکل ۱۶ دمای ماکزیمم بر حسب نرخ کرنش در درصدهای مختلف رقیق‌سازی با Ar و He (P=1atm, T_{inlet}=300K)



شکل ۱۷ دمای ماکزیمم بر حسب نرخ کرنش در دماهای مختلف (p=1atm, Dilution=40% Ar& 40% He)



شکل ۱۸ دمای ماکزیمم بر حسب نرخ کرنش در فشارهای مختلف محیط

(T_{inlet}=300K, Dilution=40% Ar & 40% He)

مراجع

1. Ribert, G., Zong, N., Yang, V., Laetitia, P., Darabiha, N. and Candel, S., "Counterflow diffusion flames of general fluids: oxygen/hydrogen mixtures", *Combustion and Flame*, 154, pp. 319–30, (2008).
2. Park, J., Lee, K. and Lee, E., "Effects of CO_2 addition on flame structure in counterflow diffusion flame of H_2/CO2/N_2 fuel", *International Journal of Energy Research*, 25, pp. 469–85, (2001).
3. Shih, H.Y., "Computed extinction limits and flame structures of H_2/O_2 counterflow diffusion flames with CO_2 dilution", *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, pp. 4005–4013, (2009).
4. Jeong, P., Kang, T.K., June, S.P., Jeong, S.K. and Sungcho, K., "A Study on H2-Air Counterflow Flamesin Highly Preheated Air Diluted with CO_2", *Energy & Fuels*, 19, pp. 2254-2260, (2005).
5. Maruta, K., Muso, K., Takeda, K. and Niioka, T., "Reaction Zone Structure in Flameless Combustion", *Proc. Combust. Inst.*, 28, pp. 2117-2123, (2000).
6. Park, J., Choi, J. W., Kim, S. G., Kim, K. T., Keel, S. I. and Noh, D. S., "Numerical study on steam-added mild combustion", *Int. J. Energy Res.*, 28, pp. 1197-1212, (2004).
7. http://www.engr.colostate.edu/~marchese/comb-ustion10/chemkin.html/2012.
8. Kee R. J. and Dixon L., "A Computational Model of the Structure and Extinction of Strained, Opposed Flow, Premixed Methane-Air Flames", *Twenty Second Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh., pp. 1479-1494, (1988).
9. Seshadri, K. and Williams, F. A., "Laminar flow between parallel plates with injection of a reactant at high Reynolds number", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 21, pp. 251–253, (1978).
10. Lutz, A. E., Kee, R. I., Grcar, J. F. and Rupley, F. M., "OPPDIF: A Fortran Program for Computing Opposed-Flow Diffusion Flames", *Sandia National Laboratories Report SAND*, pp. 96-8243, (1997).
11. Pellett, G. L., Northam, G. B., Guerra, R. and Wilson, L.G., "Opposed Jet Burner Studies of Silane-Methane, Silane-Hydrogen, and Hydrogen Diffusion Flames with Air", *CPIA Publication; 457*:Vol. 1, pp. 391-404, (1986).
12. Ho, Y. H. and Isaac K. M., "Analysis of Opposed Jet Hydrogen-Air Counter Flow Diffusion Flame", Technical Memorandum Mae-TM-25, Prepared Under NASA Langley Research Center Grant NAG; pp. 1-861, (1989).